

УДК 621.9(075.8)

В.В. Ступницький, д-р техн. наук, Н.В. Ступницька, канд техн. наук,
Львів, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНІ ЧИННИКИ ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОГЕОМЕТРІЇ ОБРОБЛЮВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ЯК РЕЗУЛЬТАТ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ФОРМОУТВОРЕННЯ

В статті наведена структура мікрорельєфу оброблюваної поверхні, що включає складову копіювання різальної частини інструмента; висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями різального інструменту та складової профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні контакту інструмента і заготовки. З метою визначення вібраційної складової мікронерівності профілю наведена нелінійна динамічна модель автоколивань технологічної системи, що враховує регенеративний механізм збудження коливань при русі інструменту по поверхні заготовки, утвореної на попередньому технологічному переході.

Ключові слова: різучий інструмент, структура мікрорельєфу, оброблювана поверхня, динамічна модель автоколивань

В статье приведена структура микрорельефа обрабатываемой поверхности, которая включает составляющую копирования режущей части инструмента; высоты микронеровностей, определяемой колебаниями режущего инструмента и составляющей профиля шероховатости, обусловленной пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки. С целью определения вибрационной составляющей микронеровности профиля приведена нелинейная динамическая модель автоколебаний технологической системы, учитывающей регенеративный механизм возбуждения колебаний при движении инструмента по поверхности заготовки, образованной на предыдущем технологическом переходе.

Ключевые слова: режущий инструмент, структура микрорельефа, обрабатываемая поверхность, динамическая модель автоколебаний

The structure of the machined surface's microrelief, which includes the component of copying the cutting geometry of the tool; as a result of the oscillation of the cutting tool and the component of the roughness profile caused by plastic deformations in the contact zone of the tool and the workpiece, is given in the article. The nonlinear dynamic model of self-oscillations of the technological system is described for the calculating the vibrational component of the roughness, also taking into account the regenerative mechanism of oscillation excitation when the tool moves along the workpiece surface formed on the previous technological step.

Keywords: cutting tool, structure of microrelief, working surface, dynamic model of self-oscillations

Вступ. Комплексний підхід до технологічного забезпечення оптимальної працездатності виробів машинобудування базується на оцінці показників якості деталей в залежності від технологічних чинників і результатів прогнозування експлуатаційних властивостей деталей в залежності від їх показників якості. Кількісні та якісні показники функціональної ефективності

виконавчих поверхонь деталей, такі як зносостійкість, втомна міцність, корозійна стійкість, трибомеханічна якість спряжень тощо, в значній мірі визначаються показниками мікротопології спряжених поверхонь виробу, якості поверхневого шару (в. т.ч. залишковими напруженнями та деформаціями), макрогеометричними властивостями деталей, що, в першу чергу, є наслідком реалізації технологічного процесу виготовлення цих виробів. У інженерній практиці проектування технологічних процесів виготовлення деталей з заданими параметрами якості ґрунтується, як правило, на технологічних принципах послідовного підвищення точності і зниження шорсткості поверхонь деталей. Проте, для ефективної реалізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу та отримання високої функціональної якості продукції цього недостатньо. Виникає необхідність проблемно-спрямованої корекції структури та параметрів технології у відповідності до умов забезпечення ефективної експлуатації машинобудівних виробів [1]. Це особливо важливо при виготовленні прецизійних деталей та деталей, що підлягають в процесі експлуатації підвищеним механічним, температурним, хімічним, трибомеханічним навантаженням або їх поєднанням. Адже саме такі деталі найчастіше забезпечують експлуатаційну якість виробу в цілому.

Стан поверхневого шару характеризується його твердістю, мікроструктурою, величиною та знаком залишкових напружень і глибиною їх залягання. Фактори, що впливають на шорсткість обробленої поверхні, також впливають і на її пластичну деформацію. Таким чином, пластична деформація, величина наклепу і висота складових мікронерівності профілю обробленої поверхні мають фізичний зв'язок, що можливо встановити методами імітаційного реологічного моделювання. Це дасть змогу здійснювати оптимальне проектування структури і параметрів технологічного процесу з врахуванням взаємопов'язаного комплексу найбільш значущих чинників процесу формоутворення деталі

Виклад основного матеріалу статті. Ідея функціонально-орієнтованого проектування полягає у визначенні та аналізі висотних та крокових параметрів мікронерівностей оброблюваних поверхонь деталі необхідному для вирішення задачі вибору такої структури та параметрів технологічних операцій та переходів, що забезпечать оптимальний комплекс функціональних властивостей цієї деталі в умовах її потенційної експлуатації [2]. Мікрорельєф обробленої поверхні утворюється в результаті векторного додавання трьох складових (рис.1) [3]: висоти мікронерівностей, одержуваної в процесі копіювання різальної частини інструмента з урахуванням кінематичних характеристик її руху (Δ_1), висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями елементів різального інструменту (Δ_2) та складової профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні контакту інструмента і заготовки (Δ_3). Слід зазначити, що незначною за

величиною складовою шорсткості, що виникає внаслідок шорсткості робочих поверхонь інструмента, можна знехтувати, оскільки ця величина не перевищує 2...5% від загального значення параметру Rz.

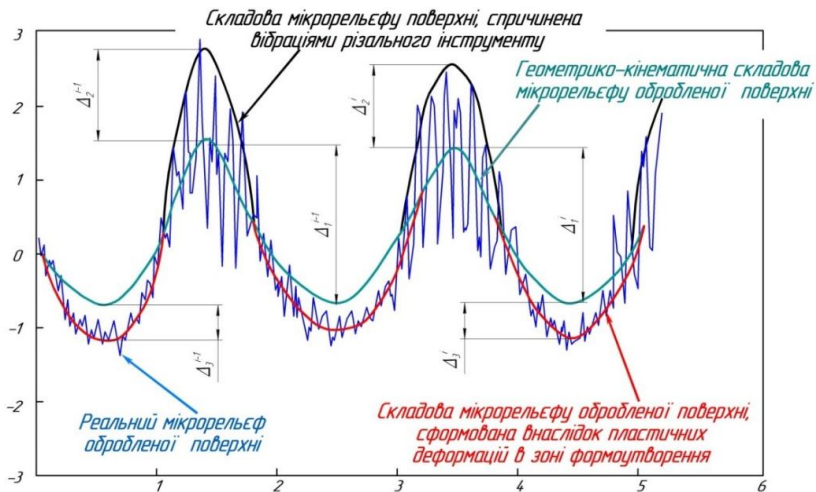


Рисунок 1 – Схема для розрахунку мікрорельєфу обробленої поверхні

У різних умовах формоутворення поверхонь деталі величина подачі та геометрія різального інструмента (формування складової Δ_1), пластичні і пружні деформації оброблюваного матеріалу (формування складової Δ_3) і вібраційні процеси системи ВПД (формування складової Δ_2) спотворюють геометрично правильну форму нерівностей, порушуючи їх закономірний розподіл на поверхні і в значній мірі збільшуючи їх висоту. У ряді випадків пластичні деформації і вібрації викликають появу хвилястості, що досягає значних розмірів, і збільшення поперечної шорсткості. Як правило, домінуючий вплив на формування шорсткості поверхні має одна з трьох вище зазначених причин, яка і визначає характер і величину шорсткості [3,4]. Проте в окремих випадках (наприклад, високошвидкісне різання або фінішна обробка) шорсткість виникає в результаті одночасного і майже рівнозначного впливу всіх вищезазначених причин. Процес виникнення нерівностей внаслідок геометричних причин прийнято трактувати як копіювання на оброблюваній поверхні траєкторії руху і форми різальних лез. З геометричної точки зору, величина, форма і взаємне розташування нерівностей (напрямок – дискретного сліду лезового інструменту) визначаються формою і

станом різальних лез і тими елементами режимів різання, які впливають на зміну траєкторії руху інструменту щодо оброблюваної поверхні.

Геометрико-кінематичні причини утворення шорсткості є очевидними [4, 5, 6] (рис. 2): за один оберт заготовки (інструменту) інструмент (заготовка) переміщається на величину подачі S , залишаючи при цьому деяку частину металу, не зруйновану різальним клином, що й утворює залишковий гребінець висотою Δ_1 . Цілком очевидно, що величина і форма нерівностей поверхні, що складаються із залишкових гребінців, визначаються подачею і формою цього різального інструменту. Висота кінематико-геометричної складової шорсткості без врахування радіуса при вершині різального інструменту r , визначається у відповідності до подачі S і головного φ та допоміжного φ_1 кута в плані різального клина.

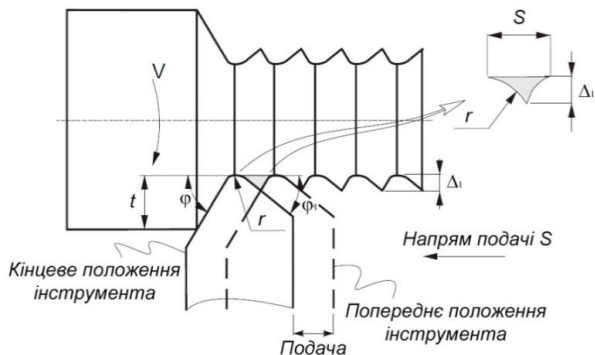


Рисунок 2 – Схема формування залишкового мікрорельєфу на обробленій поверхні (кінематико-геометричної складової шорсткості Δ_1).

З врахуванням радіуса при вершині інструменту r , розрахунок дещо ускладнюється, оскільки необхідно врахувати співвідношення головного φ та допоміжного φ_1 кута в плані. Користуючись рекомендаціями [3], величина Δ_1 з геометричної побудови (рис.2) визначається за такими залежностями:

$$\begin{aligned}
 & \text{– При } \varphi < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right) \text{ і } \varphi_1 < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right) : \\
 & \Delta_1 = \frac{S \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)} \quad (1)
 \end{aligned}$$

– При $\phi > \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\phi_1 \geq \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ внаслідок перетворення у рівняння Чебишева [293, 294]:

$$\Delta_1 = \frac{S^2}{8r} \quad (2)$$

– При $\phi < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\phi_1 < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$:

$$\Delta_1 = r \cdot (1 - \cos \phi_1) + \sin \phi_1 \left[S \cdot \cos \phi_1 - \sqrt{S \cdot \sin \phi_1 (2r - S \sin \phi_1)} \right] \quad (3)$$

– При $\phi < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\phi_1 > \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$:

$$\Delta_1 = r \cdot (1 - \cos \phi) + \sin \phi \left[S \cdot \cos \phi - \sqrt{S \cdot \sin \phi (2r - S \sin \phi)} \right] \quad (4)$$

Дані формули можна використовувати, крім точіння, при розточуванні, свердлінні, зенкеруванні, струганні та фрезеруванні торцевими фрезами. При фрезеруванні дисковими фрезами, величина кінематико-геометричної складової визначається положенням двох кіл, розташованих один від одного на відстані, що дорівнює подачі S_z на зуб фрези [7]:

$$\Delta_1 = 0,5 \left(D - \sqrt{D^2 - S_z^2} \right) \quad (5)$$

Звідси $0,25S_z^2 = \Delta_1 \cdot D - \Delta_1^2$. Величиною Δ_1^2 можна знехтувати, як величиною на 2 порядки меншою від іншої складової даної формули. Тоді формулу (5) можна записати як:

$$\Delta_1 \approx \frac{S_z^2}{D} \quad (6)$$

де D - діаметр фрези.

У процесі різання виникають вимушені коливання системи верстат-заготовка-інструмент, що викликаються дією зовнішніх сил, і автоколивання системи, поява яких пов'язана з періодичним зміцненням (наклепом) зрізаного шару металу і зміною умов тертя або різання. Вимушені коливання системи ВПД обумовлюються геометричними похибками окремих механізмів верстата. Автоколивання виникають внаслідок розбалансованості внутрішньосистемних чинників – зміни величини сил різання і тертя на робочих поверхнях інструменту, а також площі поперечного перерізу зрізаного шару металу; утворення і зриви наростів; пружними деформаціями заготовки і інструменту тощо. Очевидно, що вібрація леза різального інструменту щодо оброблюваної поверхні є додатковим джерелом збільшення шорсткості обробленої поверхні. Причому, висота шорсткості поверхні буде тим значніше, чим більше подвоєна амплітуда коливання леза

інструменту щодо оброблюваної поверхні. Фізичний механізм виникнення та розвитку автоколивань діє у такій послідовності [8]. Будь-яке випадкове збурення (динамічні процеси при врізанні та зміні руху інструменту, нерівномірність припуску, неоднорідність оброблюваного матеріалу, слід від попереднього переходу, уривчастість оброблення, радіальне биття заготовки або інструменту тощо), призводить до виникнення власних затухаючих коливань технологічної системи. Ці коливання завжди супроводжуються зміною кута зсуву ϕ і сили різання P (особливо важливою є вплив радіальної сили різання P_Y на формування мікронерівностей профілю), оскільки зона різання є замикаючою ланкою пружної технологічної системи. І якщо зміна сили різання відстає в часі (зміщується по фазі) відносно зміни товщини зрізу або якщо зі збільшенням швидкості відбувається зменшення радіальної складової сили різання (падаюча характеристика сили різання від швидкості), то власні затухаючі коливання можуть перейти в незгасаючі автоколивання, де енергію, необхідну для підтримки коливань, створює змінна сила різання. Ці два чинники - відставання зміни сили різання від зміни товщини зрізу (чи фазова характеристика сили різання) і характеристика сили різання (чи тертя), що зменшується при зростанні швидкості різання - і є основними первинними джерелами збудження автоколивань інструмента.

Очевидно, що зміна товщини зрізу a є величиною, еквівалентною куту зсуву ϕ . Таким чином, механізм виникнення стохастичних автоколивань, можна проілюструвати на прикладі аналізу реологічної імітаційної картини різання. Очевидним є зсув по фазі максимально-мінімальних значень кута зсуву і радіальної складової сили різання.

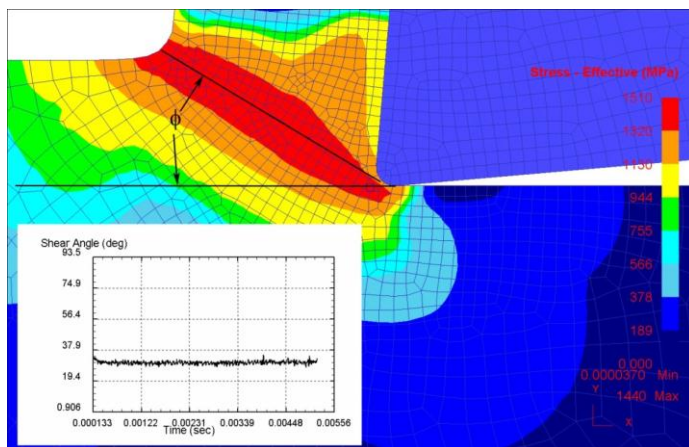


Рисунок 3 - Результат реологічного моделювання динаміки кута зсуву при обробленні деталі зі сталі 30ХГСН2А в системі DEFORM-2D [9]

Динамічна нестабільність технологічної системи при роботі на інтенсивних режимах різання обумовлена, головним чином, вторинним збудженням (регенерацією) автоколивань під впливом вібраційного сліду на поверхні різання. Очевидно, що для досягнення максимальної ефективності управління вторинними автоколиваннями треба впливати безпосередньо на сам механізм їх регенерації, що вимагає ясного розуміння його природи і закономірностей. В ході регенерації автоколивань їх фаза відносно коливань сліду встановлюється незалежно від початкових умов, що свідчить про самоорганізацію системи ВПД [8]. Руйнування цієї самоорганізації примусовою зміною фази автоколивань, наприклад, за допомогою періодичної плавної зміни (модуляції) швидкості різання, відкриває нову можливість управління динамічною стабільністю технологічної системи ВПД.

Якщо окремо розглядати процес фрезерування, то очевидно, що кожен зуб фрези, здійснюючи коливання, залишає за собою хвилясту поверхню заготовки, і в результаті кожен подальший зуб зрізує шар заготовки змінної товщини, що у свою чергу призводить до осциляцій сили різання і появи регенеративних вібрацій [10].

Для пружних технологічних систем, що здійснюють інтенсивні автоколивання, при їх моделюванні можна користуватися розрахунковою схемою, де інструмент (чи заготовка) схематизуються як точкова маса з двома ступенями вільності, що здійснює коливання в двох взаємно перпендикулярних напрямках. У кожному з напрямів маса закріплена за допомогою пружних і демпфувальних елементів. На масу діє також збурююча сила, що є результатом взаємодії різальних кромок інструменту з матеріалом заготовки - сила різання, яка може бути представлена через її складові P_z , P_y . Розрахункова схема для нелінійної динамічної моделі процесу токарного оброблення, що враховує регенеративні автоколивання різального інструменту, наведена на рис. 5.

Для пружних технологічних систем, що здійснюють інтенсивні автоколивання, при їх моделюванні можна користуватися розрахунковою схемою, де інструмент (чи заготовка) схематизуються як точкова маса з двома ступенями вільності, що здійснює коливання в двох взаємно перпендикулярних напрямках. У кожному з напрямів маса закріплена за допомогою пружних і демпфувальних елементів. На масу діє також збурююча сила, що є результатом взаємодії різальних кромок інструменту з матеріалом заготовки - сила різання, яка може бути представлена через її складові P_z , P_y .

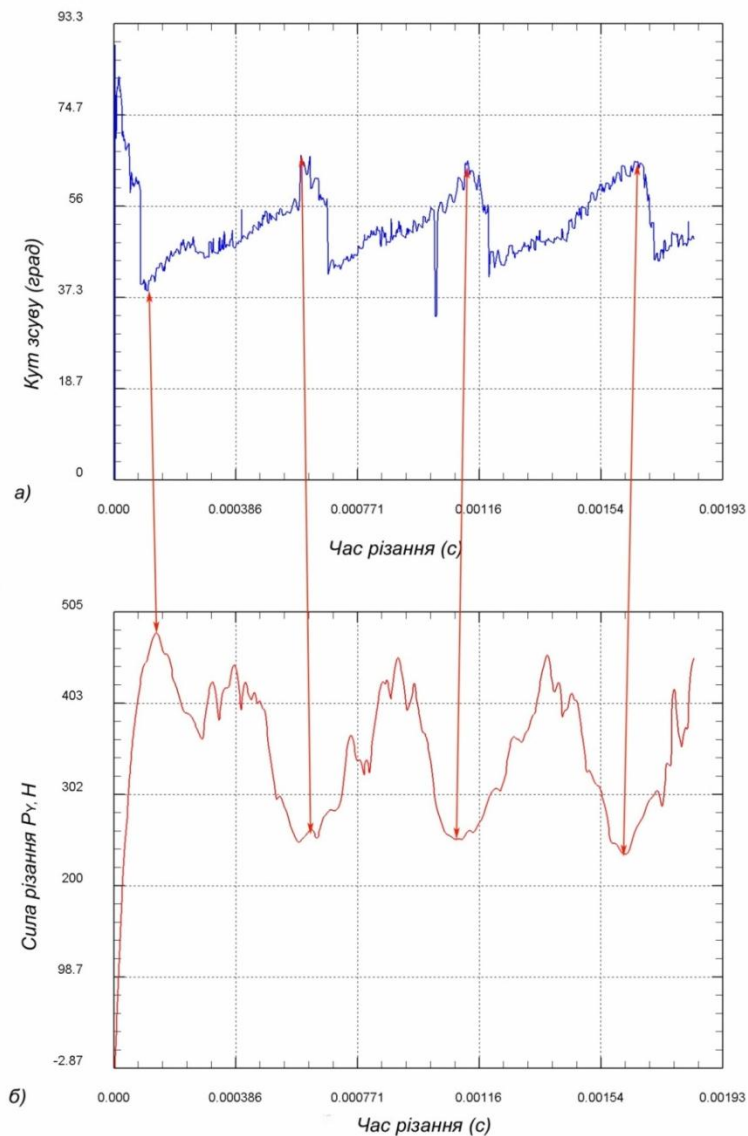


Рисунок 4 - Ілюстрація дії механізм збурення автоколивань (синхронність зсуву по фазі максимально-мінімальних значень кута зсуву (а) і радіальної складової сили різання (б)).

У загальному вигляді класичне рівняння руху інструменту може бути інтерпретовано системою рівнянь:

$$\begin{cases} M\ddot{z} + K_Z \dot{z} + C_Z z = P_Z \\ M\ddot{y} + K_Y \dot{y} + C_Y y = P_Y \end{cases} \quad (7)$$

де M - приведена маса системи; K_Z , K_Y - узагальнені коефіцієнти демпфування по осях Z і Y , відповідно; C_Z , C_Y - приведена жорсткість системи по осях Z і Y , відповідно; P_Z , P_Y - значення сил різання по осях Z і Y , відповідно.

Вирішуючи цю систему рівнянь, можна отримати значення параметрів, що визначають рух різця в процесі вібрацій. Цей рух є сумою двох коливальних рухів, зміщених на кут ψ по фазі у напрямі осей Z і Y :

$$\begin{cases} z = A_Z \cdot \sin \varpi t \\ y = A_Y \cdot \sin(\varpi t - \psi) \end{cases} \quad (8)$$

де A_Z , A_Y - амплітуди переміщень вершини різця по відповідних осях координат; ϖ - частота коливань; ψ - зсув фаз коливань по різних осях.

Складові сили різання P_Z і P_Y можна записати як функції, що залежать від умов різання, кутів інструменту і умов тертя між інструментом і заготовкою [7], а саме:

$$\begin{cases} P_Z = \frac{a \cdot b \cdot \tau \cdot \cos \omega}{\sin \phi \cos(\phi + \omega)} \\ P_Y = \frac{a \cdot b \cdot \tau \cdot \sin \omega}{\sin \phi \cos(\phi + \omega)} \end{cases} \quad (9)$$

де: τ - дотичне напруження в площині зсуву; ϕ - кут зсуву; a , b - товщина і ширина різання, відповідно; ω - кут дії між результуючою силою і напрямом подачі.

З врахуванням регенеративних коливань, дійсна товщина зрізу a стає змінною величиною, що залежить від постійної заданої величини a_1 , що визначається глибиною різання, і динамічної складової a_2 , що формується за рахунок мікро- та макронерівностей, які утворені в результаті деформацій поверхневого шару деталі після попереднього технологічного переходу або внаслідок похибок у виготовленні заготовки:

$$a = a_1 + a_2(x). \quad (10)$$

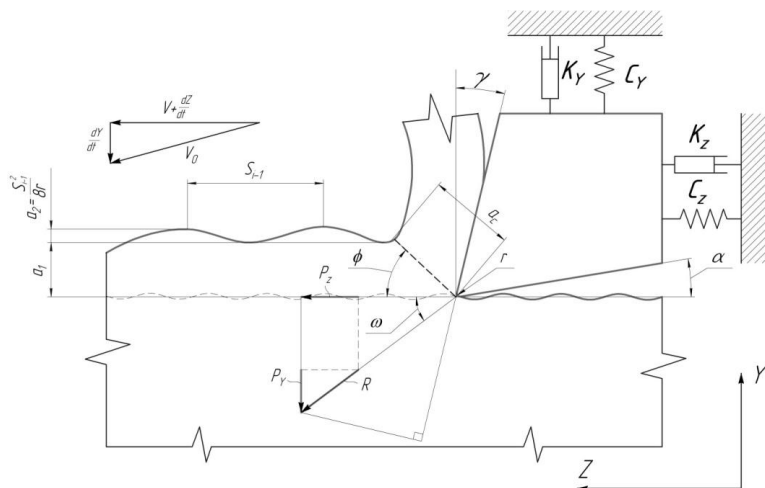


Рисунок 5 - Розрахункова схема динамічної моделі процесу оброблення, що враховує регенеративні автоколивання різального інструменту

Оскільки найбільший вплив вібраційних коливань інструменту на формування мікронерівності профілю спостерігається під час виконання чистових та фінішних операцій, то для таких умов змінну складову глибини різання можна визначити за формулою [11]:

$$a_2(x) = \frac{\Delta_1}{2} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi x}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (11)$$

Враховуючи, що $\Delta_1 = \frac{S_{i-1}^2}{8r}$ (для $\varphi > \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\varphi_1 \geq \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$):

$$a_2(x) = \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi x}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (12)$$

де S_{i-1} – подача на попередньому технологічному переході;

r – радіус при вершині інструмента.

Напруження зсуву τ_{xy} незначно залежить від швидкості різання [12], що й доведено результатами реологічного моделювання і може бути представлено як постійна величина. Кут зсуву ϕ є динамічною величиною, що змінюється в часі в результаті змінних величин: сил різання, профілю оброблюваної поверхні, геометричних параметрів та форми стружки, що детально описано в [7].

Середній коефіцієнт тертя μ між інструментом і заготовкою визначається відношенням складових сил різання P_z і P_y , що діють в зоні формоутворення отриманий таким чином:

$$\mu = \frac{P_z + P_y \cdot \operatorname{tg} \gamma}{P_z - P_y \cdot \operatorname{tg} \gamma} \quad (13)$$

Крім того, відомо, що $a \cdot b = S_i \cdot t$ [7].

Уточнена нелінійна динамічна модель автоколивань технологічної системи враховує регенеративний механізм збудження коливань при русі інструменту по поверхні заготовки, утвореної на попередньому переході. У моделі сили різання залежать від геометричних параметрів інструменту і механічних характеристик ортогонального різання [11]:

$$\begin{cases} M\ddot{y} + K_Y \dot{y} + C_Y y = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\sin \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} \\ M\ddot{z} + K_Z \dot{z} + C_Z z = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\cos \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} \end{cases} \quad (14)$$

де t - глибина різання.

Для великих швидкостей різання з врахуванням формули Мерчанта $\omega = \pi/2 - 2\phi$ [12]. Тоді з врахуванням перетворень:

$$\begin{aligned} \frac{\sin \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} &= \frac{\sin \left(\frac{\pi}{2} - 2\phi \right)}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - 2\phi \right) \cdot \sin \phi} = \frac{\cos(2\phi)}{\sin(\phi) \cdot \sin \phi} = \\ &= \frac{\cos^2 \phi - \sin^2 \phi}{\sin^2 \phi} = \frac{\cos^2 \phi}{\sin^2 \phi} - 1 = \operatorname{ctg}^2 \phi - 1 \\ \frac{\cos \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} &= \frac{\cos \left(\frac{\pi}{2} - 2\phi \right)}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - 2\phi \right) \cdot \sin \phi} = \frac{\sin(2\phi)}{\sin(\phi) \cdot \sin \phi} = \\ &= \frac{2 \sin \phi \cdot \cos \phi}{\sin \phi \cdot \sin \phi} = \frac{2 \cos \phi}{\sin \phi} = 2 \operatorname{ctg} \phi \end{aligned} ,$$

формула (14) набуде вигляду:

$$\begin{cases} M\ddot{y} + K_Y \dot{y} + C_Y y = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot (\operatorname{ctg}^2 \phi - 1) \\ M\ddot{z} + K_Z \dot{z} + C_Z z = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot 2 \operatorname{ctg} \phi \end{cases} \quad (15)$$

Для середніх швидкостей різання ($V < 100$ м/хв) використовується вираз для розрахунку кута дії за формулою Окслі: $\omega = (\phi - 0,28\pi)/0,8$ [7]. Тоді формула (15) матиме вигляд:

$$\begin{cases} M\ddot{y} + K_Y \dot{y} + C_Y y = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\sin(1,25\phi - 0,35\pi)}{\sin \phi \cdot \cos(2,25\phi - 0,35\pi)} \\ M\ddot{z} + K_Z \dot{z} + C_Z z = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\cos(1,25\phi - 0,35\pi)}{\sin \phi \cdot \cos(2,25\phi - 0,35\pi)} \end{cases} \quad (16)$$

Інтегруючи систему рівнянь чисельними методами з використанням програмного пакету MatLAB, розраховуються амплітудно-частотні характеристики коливань технологічної системи, а відтак визначається величина вібраційної складової мікронерівності Δ_2 .

Інтегруючи систему рівнянь чисельними методами з використанням програмного пакету MatLAB, знаходимо амплітудно-частотні характеристики коливань технологічної системи. Причому, лінійні гармонійні коливання інструменту в радіальному напрямі у поєднанні з головним обертальним рухом заготовки і поступальною ходою подачі викликають утворення нерівностей в подовжньому (співпадаючому з напрямом головного руху) і радіальному (перпендикулярному йому) напрямі. Високочастотні коливання інструменту мають істотний вплив на шорсткість поверхні.

Максимальна висота нерівностей профілю(мкм) буде дорівнювати [13]:

$$R_{\max} = 1000 \cdot 2A_{\max} \quad (17)$$

де A_{\max} - максимальна амплітуда коливань інструменту, що визначається при рішенні диференціального рівняння руху інструменту. Мікрорельєф поверхні в радіальному напрямі моделюється накладенням на масив переміщень інструменту профілю його вершини в плані, який описується дугою радіусу r . У цьому випадку [13]:

$$R_{\max} = \frac{2A - H_g}{1000} \quad (18)$$

де $H_g = R - (R - r) \cos \frac{\psi}{2} - \sqrt{r^2 - \left((R - r) \sin \frac{\psi}{2} \right)^2}$ - слід вершини

інструменту, мм;

$\psi = \arccos \left(1 - \frac{S^2}{2(R - r)^2} \right)$ - центральний кут, рад;

r - радіус при вершині інструменту, мм.

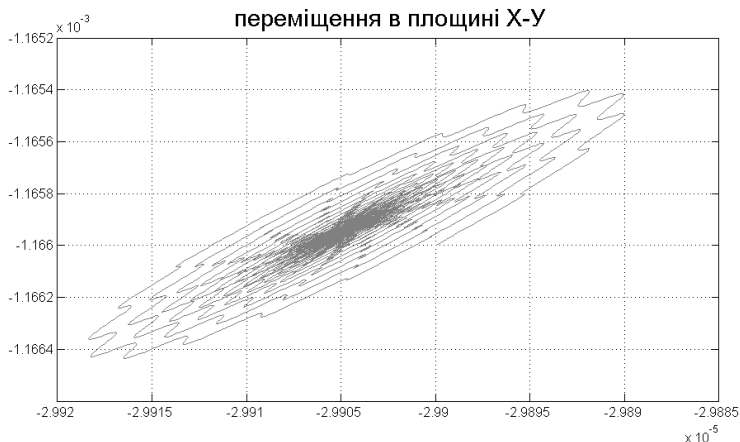


Рисунок 6 – Результати моделювання автоколивань різального інструменту при токарному обробленні деталі зі сталі 45 ($S=0,25$ мм; $t=1$ мм; $V=120$ мм/хв)

Висновки. В процесі формоутворення деталей виникають вимушені коливання системи верстат-заготовка-інструмент, що викликані динамічною дією зовнішніх сил, і автоколивання системи. Саме автоколивні процеси за частотою є найбільш значущими при формуванні вібраційної складової мікронерівності. Цей процес відбувається внаслідок розбалансованості внутрішньосистемних чинників – відставання зміни сили різання від зміни товщини зрізу і динамічною характеристикою величини сили різання, що зменшується при зростанні швидкості різання. Механізм виникнення автоколивань проілюстрований в статті на прикладі аналізу реологічної

імітаційної картини різання, що демонструє зміщення за фазою максимально-мінімальних значень кута зсуву і радіальної складової сили різання. З врахуванням регенеративних коливань, дійсна товщина злізу а стає змінною величиною, що залежить від постійної заданої величини глибини різання a_1 і динамічної складової a_2 , що формується за рахунок мікро- та макронерівностей, які утворені в результаті деформацій поверхневого шару деталі після попереднього технологічного переходу або внаслідок похибок у виготовленні заготовки. З метою визначення вібраційної складової мікронерівності профілю побудована нелінійна динамічна модель автоколивань технологічної системи, що також враховує регенеративний механізм збудження коливань при русі інструменту по поверхні заготовки, утвореній на попередньому переході. Інтегруючи систему рівнянь чисельними методами з використанням програмного пакету MatLAB розраховуються амплітудно-частотні характеристики коливань технологічної системи, що дає можливість встановити величину вібраційної складової мікронерівності.

Список використаних джерел: 1. *Stupnytsky Vadym*. Computer Aided Machine-Building Technological Process Planning by the Methods of Concurrent Engineering// Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing. Stuttgart, Germany. № 3.- 2013 (Maart). Section 1. Volume 2. P.50-53. 2. *Ступницький В.В.* Методологія проектування об'єктно-орієнтованих та функціонально-орієнтованих технологічних процесів машинобудівного виробництва / В.В.Ступницький, Н.В.Ступницька // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Високі технології в машинобудуванні. – Харків, НТУ “ХПІ”, 2016. – Вип. 1 (26). – С.91-99. 3. *Суслов А.Г.* Инженерия поверхности деталей / А.Г.Суслов. М.: Машиностроение, 2008. – 320 с. 4. *Суслов А.Г.* Научные технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный. М.: Машиностроение, 2012. - 528 с. 5. *Безъязычный В.Ф.* Расчет режимов резания / В. Ф.Безъязычный, И. Н.Аверьянов, А.В.Кордюков. – Рыбинск: РГТА, 2009.– 185 с. 6. *Силин С.С.* Оптимизация процессов резания с учетом обеспечения заданной шероховатости обработанной поверхности / С. С.Силин, В. А.Козлов // Производительная обработка и технологическая надежность деталей машин. Межвузовский сб. научных трудов. 1977. № 6. С. 36—41. 7. *Грабченко А.И.* Основы теории резания материалов / Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И. и др. ; под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. –Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с. 8. *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г.Жарков. – Л. : Машиностроение, 1986. – 184 с. 9. *Ступницький В.В.* Реологічна модель формування фізико-механічних властивостей поверхневого шару деталі під час її оброблення різанням / В.В.Ступницький // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні”, 2016, №839, с. 15-22. 10. *Внуков Ю.Н.* Разработка методики оценки уровня автоколебаний тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании / Ю. Н. Внуков [и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Високі технології в

машинобудуванні. – Харків, НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. 10. – С. 3-13. **11.** Ступницький В.В. Математичне моделювання автоколивань різального інструменту та їхній вплив на інженерію поверхні / В.В.Ступницький, Я.М.Новіцький // *Машинознавство*. 2013. — №1-2 (187-188). - С.19-22. **12.** Lee B.Y. Modeling of the process damping force in chatter vibration / B.Y.Lee, Y.S.Tarn, S.C.Ma.: Elsevier // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2005. - vol. 35, № 7. - pp. 951-962. **13.** Лившиц О.П. Моделирование формирования пластической составляющей высоты неровностей при лезвийной обработке методом конечных элементов /О.П. Лившиц, А.Е. Родыгина // *Металлообработка*, 2008. -№6. - С. 8-12.

Bibliography (transliterated): **1.** Stupnytsky Vadym. Computer Aided Machine-Building Technological Process Planning by the Methods of Concurrent Engineering// *Europaische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing, Stuttgart, Germany*. № 3.- 2013 (Maart). Section 1. Volume 2. P.50-53. **2.** Stupnic'kij V.V. Metodologija proektuvannja ob'ektno-orientovanih ta funkcional'no-orientovanih tehnologichnih procesiv mashinobudivnogo virobництва / V.V.Stupnic'kij, N.V.Stupnic'ka // *Visnik NTU «HPI»*. Serija: Visoki tehnologii v mashinobuduvanni. – Harkiv, NTU «HPI», 2016. – Vip. 1 (26). – S.91-99. **3.** Suslov A.G. Inzhenerija poverhnosti detalej / A.G.Suslov. M.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s. **4.** Suslov A.G. Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bez#jazychnyj. M.: Mashinostroenie, 2012. 528 s. **5.** Bez#jazychnyj V.F. Raschet rezhimov rezanija / V. F.Bez#jazychnyj, I. N.Aver'janov, A.V.Kordjukov. – Rybinsk: RGATA, 2009.– 185 s. **6.** Silin S.S. Optimizacija processov rezanija s uchetom obespechenija zadannoj sherohovatosti obrabotannoju poverhnosti / S.S. Silin, V. A. Kozlov // *Proizvoditel'naja obrabotka i tehnologicheskaja nadezhnost' detalej mashin. Mezhvuzovskij sb. nauchnyh trudov*. 1977. № 6. S. 36—41. **7.** Grabchenko A.I. Osnovy teorii rezanija materialov / Mazur N.P., Vnukov Ju.N., Grabchenko A.I. i dr. ; pod obshh. red. N.P. Mazura i A.I. Grabchenko. –Har'kov : NTU «HPI», 2013. – 534 s. **8.** Zharkov I.G. Vibracii pri obrabotke lezviynym instrumentom / I.G.Zharkov. – L. : Mashinostroenie, 1986. – 184 s. **9.** Stupnic'kij V.V. Reologichna model' formuvannja fiziko-mehaničnih vlastivostej poverhneвого шарu detali pid chas її obroblennja rizannjam / V.V.Stupnic'kij // *Visnik NU «Lvivs'ka politehnika» “Optimizacija virobničih procesiv i tehničnij kontrol' v mashinobuduvanni i priladobuduvanni”*, 2016, №839, s. 15-22. **10.** Vnukov Ju.N. Razrabotka metodiki ocenki urovnja avtokolebanij tonkostennoj detali pri ee koncevom frezerovanii / Ju. N. Vnukov [i dr.] // *Visnik NTU «HPI»*. Serija: Visoki tehnologii v mashinobuduvanni. – Harkiv, NTU «HPI», 2015. – Vip. 10. – S. 3-13. **11.** Stupnic'kij V.V. Matematichne modeljuvannja avtokolivan' riza'nogo instrumentu ta iħnij vpliv na inzheneriju poverhni / V.V.Stupnic'kij, Ja.M.Novic'kij // *Mashinoznavstvo*. 2013. — №1-2 (187-188). S.19-22. **12.** Lee B.Y. Modeling of the process damping force in chatter vibration / B.Y.Lee, Y.S.Tarn, S.C.Ma.: Elsevier // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2005. vol. 35, № 7. rr. 951-962. **13.** Livshic O.P. Modelirovanie formirovanija plasticheskoi sostavljajushhej vysoty nerovnostej pri lezviynoj obrabotke metodom konečnyh jelementov /O.P. Livshic, A.E. Rodygina // *MetallООbrabotka*, 2008. -№6. - S. 8-12.

Поступила в редколлегию 25.06.2018